

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ  
НА ЕМКОСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДРЕНИРУЕМЫХ ГРУНТОВ

Из теории инфильтрации [1] известно, что при выпадении атмосферных осадков на поверхность грунта в условиях стационарного влагопереноса справедливо выражение

$$h = \int_0^{\psi} \frac{d\psi}{1 - \omega / k(\theta)} \quad (1)$$

где  $\psi$  — капиллярная составляющая потенциала почвенной влаги (высота всасывания);  $\psi = -h_{\text{кап}}$ ;  $\omega$  — интенсивность инфильтрационного питания;  $k(\theta)$  — коэффициент влагопроводности при влажности  $\theta$ ;  $h$  — высота над УГВ, на которой при наличии инфильтрации устанавливается влажность  $\theta(h)$ .

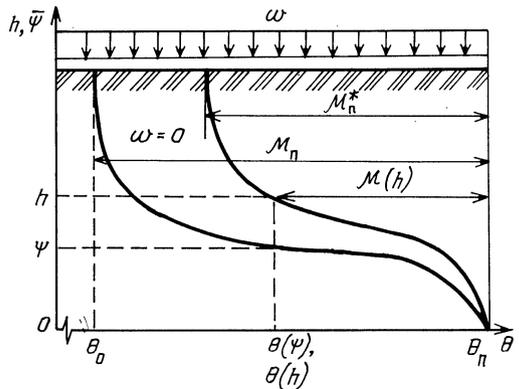


Рис. 1. Профили равновесного влагосодержания в дренируемых грунтах при наличии инфильтрационного питания

Из уравнения (1) следует, что при отсутствии влагопереноса в зоне неполного насыщения ( $\omega = 0$ ) высота всасывания  $\psi$  численно равна высоте  $h$  над уровнем подземных вод (рис. 1). В случае нисходящего потока влаги  $\psi < h$  влажность в любом сечении колонны с грунтом больше равновесной. При использовании выражения (1) представляется возможным построить эпюры распределения влажности в зоне неполного насыщения при стационарном вертикальном влагопереносе, а также количественно оценить характер изменения емкостных характеристик дренируемых грунтов в зависимости от интенсивности инфильтрационного питания, что и составляет цель проведенных исследований.

Для решения поставленной задачи необходимо располагать количественными зависимостями между влажностью  $\theta(\psi)$  и влагопроводностью  $k(\psi)$ , а также между влажностью  $\theta(\psi)$  и высотой всасывания  $\psi$ , называемой основной гидрофизической характеристикой грунтов.

Следуя С.Ф. Аверьянову [2], примем зависимость между  $\theta(\psi)$  и  $k(\psi)$  в виде

$$k(\psi) = k_{\phi} \left( \frac{\theta(\psi) - \theta_0}{m - \theta_0} \right)^n, \quad (2)$$

где  $k_{\phi}$  — коэффициент фильтрации дренируемых грунтов;  $\theta_0$  — наименьшая влагоемкость;  $m$  — пористость грунта,  $m = \theta_n + P$ ;  $P$  — воздухосодержание в водонасыщенном грунте (в долях объема);  $\theta_n$  — полная влагоемкость;  $n$  — эмпирический коэффициент,  $n = 3-4$ .

Для упрощения расчетов и получения более простых по структуре итоговых расчетных зависимостей преобразуем уравнение (2). Общеизвестно, что при медленном насыщении грунтов водой в их порах содержится, как правило, не менее 5–10 % заземленного воздуха [2, 3]. По выражению (2) можно оценить влагопроводность при полном насыщении в зависимости от воздухо-содержания:

$$k_{\text{в}} = k_{\phi} \left( \frac{\theta_n - \theta_0}{\theta_n + P - \theta_0} \right)^n = k_{\phi} \left( \frac{\mu_n}{\mu_n + P} \right)^n = k_{\phi} / \beta, \quad (3)$$

где  $\mu_n$  — предельное значение коэффициента водоотдачи,  $\mu_n = \theta_n - \theta_0$ . Перепишем уравнение (2) в терминах водоотдачи:

$$k(\psi) = k_{\phi} \left( \frac{\mu_n - \mu(\psi)}{\mu_n + P} \right)^n. \quad (4)$$

Сравнивая (1) и (4), можно получить

$$k(\psi) = k_{\text{в}} \left( \frac{\mu_n - \mu(\psi)}{\mu_n} \right)^n = k_{\text{в}} (1 - \bar{\mu}(\psi))^n \quad (5)$$

$$(\bar{\mu}(\psi) = \mu(\psi) / \mu_n).$$

Выражение (5) предпочтительнее в расчетах, поскольку в полевых и лабораторных условиях определяется, как правило,  $k_{\text{в}}$  (для определения  $k_{\phi}$  необходимо, например, производить предварительное вакууммирование исследуемых образцов и другие мероприятия).

Тогда с учетом (5) можно получить

$$\omega = k(\psi) = k_{\text{в}} \left( \frac{\mu_n - \mu_n^*}{\mu_n} \right)^n, \quad (6)$$

где  $\mu_n^*$  — предельное значение коэффициента водоотдачи при наличии инфильтрации,  $\mu_n^* = \mu(h)$  при  $h \rightarrow \infty$ .

Из выражения (6) имеем (см. рис. 1):

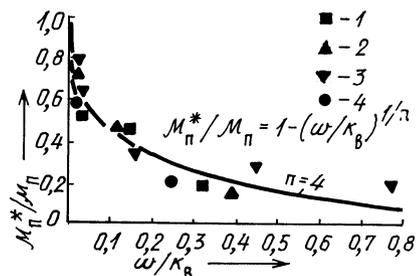
$$\mu_n^* = \mu_n [ 1 - (\omega / k_{\text{в}})^{1/n} ], \quad (7)$$

Или с учетом (3)

$$\mu_n^* = \mu_n [ 1 - \beta (\omega / k_{\phi})^{1/n} ]. \quad (8)$$

На рис. 2 представлены результаты обобщения опубликованных лабораторных опытов С.М. Проскурникова [4], в которых, в частности, исследовался процесс водоотдачи песков различного гранулометрического состава в зависимости от интенсивности инфильтрационного питания. Как следует из графика, приведенного на рисунке, экспериментальные данные вполне удовлетворительно согласуются с зависимостью (8) при показателе степени  $n = 4$ .

Рис. 2. Сопоставление результатов экспериментов С.М. Проскурникова [4] с теоретической зависимостью (8) при  $n = 4$ : 1 — песок U,  $0,5 > d > 0,1$ ; 2 — песок K,  $0,25 > d > 0,5$ ; 3 — песок "саблинский", мелкозернистый; 4 — песок С, крупнозернистый



В случае изучения водоудерживающей способности грунтов необходимо учитывать наличие гистерезиса кривых  $\theta(\psi) = f(\psi)$  для процессов увлажнения (осушения). В настоящее время более детально исследованы кривые водоудерживания (десорбционные кривые), представляющие наибольший практический интерес. Обширная сводка эмпирических и полуэмпирических формул, используемых для описания кривых водоудерживания, содержится в работах [3, 5, 6]. Анализ публикаций по данному вопросу ([6, 7] и др.) свидетельствует о том, что характерные особенности распределения почвенной влаги при стационарном влагопереносе достаточно полно могут быть учтены с помощью двух- или трехпараметрических формул, константы которых определяются на основе регрессионного анализа опытных данных.

Нами была использована двухпараметрическая зависимость (9), рекомендуемая в работе [8],

$$\theta(\psi) = \theta_0 + (\theta_n - \theta_0) \exp(-\alpha \psi^2), \quad (9)$$

где  $\alpha$  — эмпирический коэффициент, учитывающий особенности водоудерживающей способности исследуемых грунтов.

В терминах водоотдачи (см. рис. 1) имеем

$$\mu(\psi) = \mu_n [1 - \exp(-\alpha \psi^2)] \quad (10)$$

или

$$\bar{\mu}(\psi) = 1 - \exp(-\alpha \psi^2), \quad (11)$$

Здесь  $\bar{\mu}(\psi) = \mu(\psi) / \mu_n$  — нормированное значение коэффициента водоотдачи при высоте всасывания  $\psi$ .

С учетом формул (5) и (11) зависимость (1) приводится к виду

$$h = \int_0^{\psi} \frac{d\psi}{1 - \bar{\omega} \exp(\alpha n \psi^2)} \quad (12)$$

где  $\bar{\omega}$  — нормированное значение интенсивности инфильтрационного питания,  $\bar{\omega} = \omega / k_b$ .

Было произведено численное интегрирование уравнения (12) при различных значениях параметров  $\alpha$ ,  $\bar{\omega}$  и  $n = 4$ . На основе обобщения результатов выполненных расчетов построены профили влажности  $\theta = f(h, \bar{\omega})$  и  $\mu = f(h, \bar{\omega})$ . Анализ кривых показал, что с вполне допустимой для инженерных расчетов погрешностью в определении  $\theta$  и  $\mu$  (порядка 10–15%) эти кривые могут быть описаны формулами типа (9), (10). Однако параметр  $\alpha$  в них при наличии инфильтрации должен быть соответствующим образом откорректирован (рис. 3).

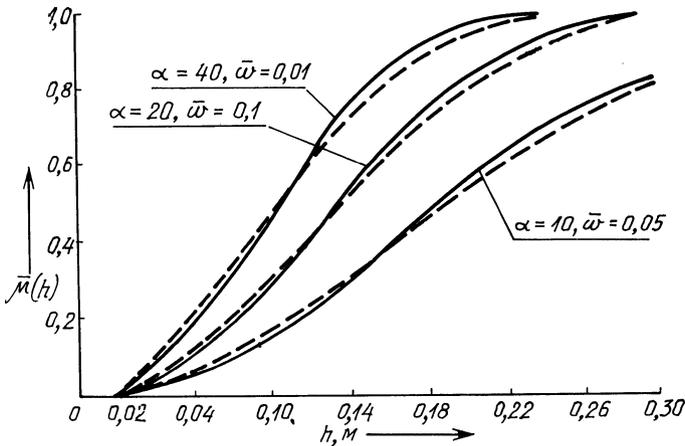


Рис. 3. Характер изменения нормированного коэффициента водоотдачи  $\bar{\mu}(h) = \mu_h / \mu_n^*$  в зависимости от параметра  $\alpha$ , высоты  $h$  над уровнем грунтовых вод и нормированной величины инфильтрационного питания  $\bar{\omega}$

Общая формула для количественной оценки коэффициента водоотдачи дренируемых грунтов в пределах зоны влияния капиллярной каймы и при наличии инфильтрации с поверхности грунта получена в виде [9]:

$$\mu(h) = \mu_n^* [1 - \exp(-\alpha^* h^2)], \quad (13)$$

где

$$\mu_n^* = \mu_n (1 - \sqrt[4]{\omega/k_b}); \quad \alpha^* = \alpha (1 + 1,75 \sqrt[4]{\omega/k_b}). \quad (14)$$

В настоящее время при выполнении расчетов по формулам неустановившейся фильтрации расчетные значения коэффициента водоотдачи принимаются неизменными в случае наличия инфильтрационного питания и без него. Это, как следует из выражений (13) и (14), может приводить к недопустимым погрешностям в прогнозных расчетах. Применение в инженерных расчетах полученных зависимостей позволяет более полно, по сравнению с существующими

учитывать физические процессы, происходящие в зоне неполного насыщения при наличии инфильтрации, и тем самым существенно повышать точность и надежность прогнозных расчетов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Ч а й д л з Э. Физические основы гидрологии почвы. — Л., 1973. — 428 с.
2. А в е р ь я н о в С.Ф. Зависимость водопроницаемости почвогрунтов от содержания в них воздуха // Докл. АН СССР, 1949. — Т. 69. — № 2. 3. Н о с о в а О.Н. Расчет водоотдачи песчаных грунтов. — М.; Л., 1962. — 116 с. 4. П р о с к у р н и к о в С.М. Результаты экспериментального изучения движения гравитационной пленочной воды в однородных песках. — Тр. ГГИ. — Л., 1948. — Вып. 8 (62). — С. 111—149. 5. В а р а л л я й Д. Математическое описание основных воднофизических характеристик почв // Почвоведение. — 1982. — № 4. — С. 77—89. 6. П а ш к о в с к и й И.С. Закономерности процессов насыщения и осушения водоносных горизонтов // Гидрогеология и инженерная геология: Обзор ВИЭМС. — М., 1983. — 38 с. 7. Щ е р б а к о в Г.А., Ж и б у р т о в и ч К.К. Определение водовместимости песчаных грунтов по данным гранулометрического состава // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — Минск, 1986. — Вып. 15. — С. 56—62. 8. Щ е р б а к о в Г.А. Прогноз изменения уровня дренажного режима дренируемых территорий на основе учета баланса влаги в зоне аэрации // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. — Минск, 1984. — Вып. 13. — С. 95—160. 9. Щ е р б а к о в Г.А., С а в ч е н к о А.П. Влияние интенсивности инфильтрационного питания на величину коэффициента водоотдачи грунтов // Тез. докл. Всесоюза. науч.-техн. совещ. "Состояние и задачи комплексного использования водных ресурсов страны", 22—24 апр. — Минск: ЦНИИКИВР, 1986. — С. 84.

УДК 624.64:626.8

Ю.Ф. БУРТЫС, П.К. ЧЕРНИК,  
Г.А. ПИЩЕЦКИЙ, кандидаты техн. наук (БелНИИМВХ)

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАПОРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ОБЛАСТИ С ДВУХПУНКТОВЫМ ФЛЮТБЕТОМ МЕТОДОМ $p$ -ТРАНСФОРМАЦИИ

В местах строительства мелиоративных сооружений геологическая обстановка при схематизации нередко аппроксимируется сравнительно простыми областями фильтрации, в том числе прямоугольной формы. Но даже и в этом относительно несложном случае гидротехнический расчет подземного контура регулирующих водоподпорных сооружений ни точными методами математического анализа [1], ни приближенными инженерными способами [2, 3] не может быть выполнен аналитически из-за отсутствия решений возникающих задач.

Преимущество использования численного метода  $p$ -трансформации в сравнении с конечно-разностными методами заключается в возможности сведения рассматриваемой задачи фильтрации к решению сравнительно небольшого количества линейных алгебраических уравнений. Следовательно, во многом устраняются трудности в достижении сходимости методов последовательных